

Научная статья

УДК 530.145

[https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)4-02](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)4-02)

Анализ применения квантового эффекта Зенона для обеспечения устойчивости кубитов

*Андрей Александрович Борисов¹, Антон Александрович Борисов²,
Тимур Фянович Камалов³*

¹Государственный университет просвещения, Москва, Россия,
andreyborisov1998@mail.ru

²Государственный университет просвещения, Москва, Россия,
toni.borisov.98@mail.ru

³Государственный университет просвещения, Москва, Россия,
timkamalov@mail.ru

Original article

Analysis of the Quantum Zeno Effect Application to Ensure the Stability of Qubits

Andrey A. Borisov¹, Anton A. Borisov², Timur F. Kamalov³

¹Federal State University of Education, Moscow, Russia, andreyborisov1998@mail.ru

²Federal State University of Education, Moscow, Russia, toni.borisov.98@mail.ru

³Federal State University of Education, Moscow, Russia, timkamalov@mail.ru

Аннотация. Квантовый эффект Зенона заключается в подавлении эволюции квантовой системы вследствие частых последовательных измерений, что приводит к ингибированию переходов между квантовыми состояниями. В рамках рассматриваемой работы кубит может находиться в возбужденном состоянии $|1\rangle$ либо в невозбужденном состоянии $|0\rangle$. Цель работы состоит в исследовании применения квантового эффекта Зенона для устойчивого возбужденного состояния кубита и предотвращения его самопроизвольного перехода в состояние $|0\rangle$. В качестве физической реализации кубита рассматривается атом As, а регистрация квантового состояния предполагается с использованием методов сканирующей зондовой микроскопии. В работе продемонстрировано условие, необходимое для возникновения квантового эффекта Зенона в исследуемой системе. Результаты расчетов показывают, что диаметр орбитальной зоны атома As в возбужденном состоянии превышает диаметр атома в невозбужденном состоянии в 1,5 раза. Данное соотношение выступает в качестве экспериментального критерия идентификации состояния кубита.

Ключевые слова: квантовые биты, эффект Зенона, устойчивость, квантовая система, микроскопия

Abstract. The quantum Zeno effect lies in the suppression of the quantum system's evolution due to frequent successive measurements, which leads to the inhibition of transitions between quantum states. The paper presumes that a qubit can be found in an excited state $|1\rangle$ or in the non-excited state $|0\rangle$. The work aims to investigate how the quantum Zeno effect can be applied to the stable excited state of a qubit to prevent its spontaneous transition to the state $|0\rangle$. An As atom is exploited as the physical realization of a qubit, and it is suggested to register its quantum state using the scanning probe microscopy methods. The work demonstrates the condition necessary for the occurrence of the quantum Zeno effect in the system under study. Calculation results show that the diameter of the excited-state As atom orbit is 1.5 times larger than the diameter of an unexcited atom orbit. This ratio serves as an experimental criterion for identifying the state of a qubit.

Keywords: quantum bits, Zeno effect, stability, quantum system, microscopy

Для цитирования: Борисов А.А., Борисов А.А., Камалов Т.Ф. Анализ применения квантового эффекта Зенона для обеспечения устойчивости кубитов // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 4 (150). С. 22–27. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)4-02](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)4-02).

For citation: Borisov A.A., Borisov A.A., Kamalov T.F. Analysis of the Quantum Zeno Effect Application to Ensure the Stability of Qubits. *Izvestiya of Altai State University*. 2026. No 4 (150). P. 22–27. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)4-02](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)4-02).

Введение

Квантовый эффект Зенона проявляется в том, что при последовательных и частых измерениях квантовое [1] состояние устойчиво. Теоретические основы данного эффекта были предсказаны Халфиным [2], а позднее Мисра и Сударшан [3] ввели термин «квантовый эффект Зенона». Основываясь на теории Кука [4], Итано и др. [5] провели экспериментальные исследования, подтвердившие данный эффект. Вопросы и задачи, связанные с обнаружением, а также классификацией сложных многокубитных запутанных [6] состояний, остаются открытыми в настоящее время.

Исследование квантового эффекта Зенона [7] представляет значительный теоретический и практический интерес в вопросах фундаментальных принципов квантовой физики [8], а также разработки перспективных квантовых технологий.

Динамика двухуровневых систем в твердотельных структурах является одной из центральных задач современной квантовой физики, в частности в контексте кремниевых донорных кубитов и управления декогеренцией. Донорные центры в кремнии демонстрируют рекордные времена когерентности и технологическую совместимость с микроэлектроникой [9,10].

Одна из ключевых проблем квантовых вычислений связана с утратой когерентности. В данной статье квантовый эффект Зенона направлен на повышение устойчивости кубитов к декогеренции.

Квантовый эффект Зенона: теоретическое описание

В настоящей работе рассматривается проблема квантовых переходов между состояниями, динамика которых описывается уравнением Шрёдингера. Анализ коротковременной области эволюции квантовой системы при измерениях демонстрирует возможность проявления квантового эффекта Зенона. В условиях последовательных измерений, проводимых с временным интервалом τ_t , вероятность отсутствия перехода системы в течение времени t , обозначаемая как $V(t)$, определяется соответствующим математическим [1] выражением:

$$V(t) \cong \exp\left(-\frac{\tau_t}{\tau_z^2} t\right) \text{ при } \tau_t \rightarrow 0, \quad (1)$$

где τ_z — время Зенона, определяющееся разбросом энергии начального [1] состояния при $\hbar = 1$:

$$\tau_z \equiv [\langle \psi_0 | \mathcal{H}^2 | \psi_0 \rangle - \langle \psi_0 | \mathcal{H} | \psi_0 \rangle^2]^{-1/2}, \quad (2)$$

где $|\psi_0\rangle$ — начальное квантовое состояние, $\mathcal{H}$ — гамильтониан.

Необходимо реализовать режим измерения состояния кубита, при котором интервал между измерениями значительно меньше времени декогеренции системы.

Анализ квантовых состояний двух кубитов

Рассматривается квантовая система, в которой кубит может находиться в возбужденном состоянии $|1\rangle$ или в основном (невозбужденном) состоянии $|0\rangle$. Комплексные амплитуды волновых функций, соответствующие данным состояниям, обозначены как $K_1(t)$ и $K_0(t)$ соответственно. Исходя из уравнения Шрёдингера, динамика квантовых состояний кубита описывается системой дифференциальных уравнений:

$$i\hbar \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} K_0(t) \\ K_1(t) \end{bmatrix} = \mathcal{H} \begin{bmatrix} K_1(t) \\ K_0(t) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Гамильтониан запишем в виде:

$$\mathcal{H} = \frac{\hbar\Omega}{2} \sigma_x, \quad (4)$$

где Ω — частота когерентного перехода, σ — матрица Паули.

Система уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} \dot{K}_0(t) = -i \frac{\Omega}{2} K_1(t) \\ \dot{K}_1(t) = -i \frac{\Omega}{2} K_0(t) \end{cases}. \quad (5)$$

При рассмотрении предела интервала времени наблюдения $t \rightarrow 0$, амплитуда волновой функции $K_0(t)$ аппроксимируется значением, близким к единице ($K_0(t) \cong 1$). Аппроксимируем вероятность обнаружения кубита в состоянии $|1\rangle$ величиной $V_1(t)$:

$$V_1(t) \cong |K_1(t)|^2 \cong \frac{\Omega^2}{4} t^2. \quad (6)$$

Тогда вероятность обнаружения кубита в состоянии $|0\rangle$ определяется выражением $V_0(t)$:

$$V_0(t) \cong 1 - V_1(t). \quad (7)$$

Таким образом, анализ квантовых состояний является теоретической основой для экспериментального изучения устойчивости квантовых состояний в условиях частых измерений.

В рамках исследования двух кубитов, рассматривая вероятность обнаружения первого кубита в состоянии $V_1(t)$, предполагается, что она оказывает влияние на вероятность обнаружения второго кубита в состоянии $V_0(t)$. Экспериментальное выявление корреляционной зависимости между указанными вероятностями позволит предположить наличие квантовой запутанности в системе.

Численная оценка атома As

Атом As рассматривается как донорный центр в кремнии в рамках приближения эффективной массы, широко применяемый для описания примесных состояний в полупроводниках.

В данной модели электрон донорного центра описывается аналогично электрону в водородоподобном кулоновском потенциале с учетом эффективной массы носителя заряда и диэлектрической проницаемости кремния. Такой подход является стандартной моделью «кулоновского центра» для доноров V группы в Si и позволяет оценивать энергетические уровни и пространственную локализацию электронных состояний.

Оценка изменения размера атома As в возбужденном состоянии основана на квантовой механике, согласно которой радиус орбитали пропорционален квадратичной зависимости главного квантового числа n^2 . Тогда при переходе электрона с уровня $n_4 = 4$ (невозбужденное состояние) на уровень $n_5 = 5$ (возбужденное состояние) соотношение их диаметров D орбитальной зоны увеличивается в соотношении:

$$D = \frac{d_5}{d_4} = \frac{n_5^2}{n_4^2}. \quad (8)$$

Полученное соотношение изменения диаметра орбитальной зоны атома As в 1,5 раза следует рассматривать как оценку порядка величины, полученную в рамках упрощенной одноэлектронной модели, без учета многоэлектронных корреляционных эффектов и экранированием внутренними оболочками. Квантовые числа выбраны таким образом, что сохранена локализация электрона и получено максимальное отношение диаметров.

Частота перехода ν_{4-5} между энергетическими состояниями с квантовыми числами n_4 и n_5 связана как:

$$\nu_{4-5} = \frac{R_{eff}}{\hbar} \left(\frac{1}{n_4^2} - \frac{1}{n_5^2} \right), \quad (9)$$

где R_{eff} — эффективная энергия Ридберга атома As в кремнии, составляет величину 26–50 мэВ.

Величины согласуются с эффективномассовой моделью донорных состояний в кремнии и экспериментальными исследованиями примесных центров As в Si [11, 12].

Рассматривается режим $\Omega \ll \nu_{4-5}$, соответствующий слабому внешнему [13] воздействию. Исходя из этого, примем величину Ω порядка 10^8 с^{-1} , что существенно меньше частоты $\nu_{4-5} \approx 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

Следует подчеркнуть, что приведенные оценки основаны на водородоподобной модели и служат первым приближением для дальнейших расчетов.

Учет декогеренции:

мастер-уравнение Линдблада

Сканирующая зондовая микроскопия включает два основных типа измерительных устройств — СТМ (сканирующий туннельный микроскоп) или АСМ (атомно-силовой микроскоп).

Для рассматриваемой физической реализации кубита на основе атома As, находящегося в поле зонда сканирующего туннельного микроскопа, доминирующим каналом декогеренции является спонтанное излучение при переходе из возбужденного состояния $|1\rangle$ в $|0\rangle$.

В настоящей работе предполагается режим слабого неразрушающего измерения, при котором взаимодействие зонда АСМ с квантовой системой носит дисперсионный характер. Предполагается, что энергия взаимодействия зонда с локализованным электронным состоянием существенно меньше разности энергий между двумя квантовыми состояниями системы. В данном приближении измерение состояния не вызывает переходы между стационарными состояниями и приводит лишь к слабому возмущению квантовой системы.

Эволюция плотностной матрицы описывается мастер-уравнением Линдблада:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar} [\mathcal{H}, \rho] + \gamma \left(\sigma_- \rho \sigma_+ - \frac{1}{2} \{ \sigma_+ \sigma_-, \rho \} \right), \quad (10)$$

где ρ — матрица плотности, γ — коэффициент декогеренции, $\sigma_{\pm}$ — операторы перехода из состояния $|1\rangle$ в $|0\rangle$, и наоборот.

Реализация режима квантового эффекта Зенона соответствует условию:

$$\nu_t \gg \max(\gamma, \Omega), \quad (11)$$

где ν_t — частота измерений.

Исследование квантового эффекта Зенона методами сканирующей зондовой микроскопии

В режиме СТМ основной измеряемой величиной является туннельный ток. Электронное туннелирование происходит между острием зонда

и поверхностью образца, разделенными вакуумным зазором. Регистрация туннельного тока осуществляется с временным разрешением Δt .

Современные высокочастотные СТМ-системы демонстрируют временное разрешение Δt порядка $10^{-10} \div 10^{-9}$ с, что соответствует [14] частоте измерений:

$$\nu_t = \frac{1}{\Delta t}. \quad (12)$$

Согласно расчетам, величина ν_t варьируется от 10^9 до 10^{10} с $^{-1}$.

Примем, что $\gamma \sim \Omega$ одного порядка, тогда условие (11) выполняется для реализации режима квантового эффекта Зенона.

В АСМ зонд представляет собой кантилевер, совершающий механические колебания над поверхностью образца. Основными измеряемыми величинами являются смещение кантилевера x и сила взаимодействия зонда с поверхностью F .

Кантилевер может быть описан в рамках модели квантового гармонического осциллятора с эффективной массой m , собственной угловой частотой ω_0 и импульсом p . Гамильтониан системы $\mathcal{H}_{sys}$ имеет вид:

$$\mathcal{H}_{sys} = \mathcal{H} + \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega_0^2 x^2 - Fx. \quad (13)$$

Константа связи кубита с внешним воздействием определяется как:

$$J = \frac{F}{\sqrt{2\hbar m \omega_0}}. \quad (14)$$

Тогда коэффициент декогеренции определяется величиной:

$$\gamma = \frac{J^2}{k}, k = \frac{\omega_0}{2Q}, \quad (15)$$

где Q — добротность кантилевера.

Для J характерно следующее:

$$J \sim \sqrt{\Omega k}. \quad (16)$$

Для выполнения условия (11) применяют следующее выражение:

$$\nu_t \gg \sqrt{\Omega k}. \quad (17)$$

В теоретической модели условие (17) обеспечивает квантовый эффект Зенона в АСМ. Величина Q кантилевера [15] в криогенных условиях может достигать $10^4 \div 10^5$, что позволяет обеспечить малую ширину резонанса и повысить чувствительность к квантовым переходам.

Полученные оценки соответствуют современным [16, 17] экспериментальным данным для высокочастотных СТМ/АСМ систем и твердотельных кубитов на донорных центрах в кремнии.

Сопоставление полученных результатов с литературными источниками

Полученные в работе результаты соотносятся с современными исследованиями, посвященными защите квантовых состояний и увеличению времени когерентности кубитов за счет частых измерений.

В обзоре [18] показано, что квантовый эффект Зенона является механизмом подавления квантовой динамики и может рассматриваться как предельный случай непрерывного измерения.

В работе [19] экспериментально продемонстрировано управление квантовой эволюцией с помощью последовательных измерений в системах с дискретными энергетическими уровнями. Эти результаты близки по физическому смыслу к рассматриваемому подходу в настоящей работе, где роль измерений играет процесс зондирования.

Применительно к кубитам и квантовым вычислениям в монографии [20] показано, что частые измерения и непрерывное наблюдение могут эффективно подавлять процессы декогеренции. В статье [21] показано, что непрерывное квантовое измерение в сверхпроводниковых и твердотельных кубитах приводит к эффектам, эквивалентным квантовому эффекту Зенона.

Таким образом, полученные в настоящей работе выводы согласуются с современными зарубежными исследованиями, однако отличаются способом реализации: вместо специализированных импульсных схем управления предлагается использовать стандартные измерительные режимы сканирующей зондовой микроскопии.

Заключение

В отличие от подходов, использующих внешние управляющие импульсы или специально сконструированные квантовые системы, предлагаемый метод основан на интерпретации стандартного измерительного процесса в сканирующей зондовой микроскопии, который реализует квантовый эффект Зенона. Это позволяет рассматривать СЗМ не только как диагностический, но и как управляющий инструмент для устойчивости квантовых состояний.

В работе предлагается использовать частоту измерений, превышающую частоту когерентного перехода, вследствие чего динамика двухуровневой системы переходит в режим квантового эффекта Зенона, при котором вероятность перехода подавляется. Определен критерий оценки квантового эффекта Зенона для рассматриваемой системы.

Полученные оценки демонстрируют реализуемость предложенного подхода в современных экспериментальных системах. Данная статья задает направление для дальнейших исследований, включающих численное моделирование открытой квантовой системы с учетом реальных параметров атомной структуры.

Библиографический список

1. Sokolovski D., Pons M., Kamalov T. Anomalous Zeno Effect for Sharply Localised Atomic States // *Physical Review A*. 2012. Vol. 86. No 2. P. 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.86.022110>
2. Халфин Л.А. Феноменологическая теория К-мезонов и неэкспоненциальность закона распада // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1968. Т. 8. № 2. С. 106–109.
3. Misra B., Sudarshan E.G.G. The Zeno's Paradox in Quantum Theory // *Journal of Mathematical Physics*. 1977. Vol. 18. No 4. P. 756–763. <https://doi.org/10.1063/1.523304>
4. Cook R.J. What are Quantum Jumps? // *Physica Scripta*. 1988. No 21. P. 49–51. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/1988/T21/009>
5. Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J., et al. Quantum Zeno Effect // *Physical Review A*. 1990. Vol. 41. No 5. P. 2295–2300. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.41.2295>
6. Ahmadiyaz N., Geller M., Konig J., et al. Quantum Zeno Manipulation of Quantum Dots // *Physical Review Research*. 2022. Vol. 4. No 3. P. 032045. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.L032045>
7. Slichter D.H., Muller C., Vijay R., et al. Quantum Zeno Effect in the Strong Measurement Regime of Circuit Quantum Electrodynamics // *New Journal of Physics*. 2016. Vol. 18. No 5. P. 053031. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/5/053031>
8. Burgarth D., Facchi P., Nakazato H., et al. Quantum Zeno Dynamics from General Quantum Operations // *Quantum*. 2020. Vol. 4. No 3. P. 032045. <https://doi.org/10.22331/q-2020-07-06-289>
9. Juha T.M., Juan P.D., Arne L., et al. Storing Quantum Information for 30 Seconds in a Nanoelectronic Device // *Nature Nanotechnology*. 2014. Vol. 9. No 12. P. 986–991. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.211>
10. Morello A., Pla J.J., Zwanenburg F.A., et al. Single-Shot Readout of an Electron Spin in Silicon // *Nature*. 2010. Vol. 467. No 7316. P. 687–691. <https://doi.org/10.1038/nature09392>
11. Claes J., Partoens B., Lamoen D., et al. An Accurate DFT-1/2 Approach for Shallow Defect States: Efficient Calculation of Donor Binding Energies in Silicon // *Nature Publishing Group Computational Materials*. 2026. Vol. 12. No 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41524-026-02003-2>
12. Swift M.W., Peelaers H., Mu S., et al. FirstPrinciples Calculations of Hyperfine Interaction, Binding Energy, and Quadrupole Coupling for Shallow Donors in Silicon // *Nature Publishing Group Computational Materials*. 2020. Vol. 6. No 1. P. 181. <https://doi.org/10.1038/s41524-020-00448-7>
13. Muhonen J.T., Dehollain J.P., Laucht A., et al. Coherent Control Via Weak Measurements 31P in Single-Atom Electron and Nuclear Spin Qubits // *Physical Review B*. 2018. Vol. 98. No 15. P. 155201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.155201>
14. Loth S., Etzkorn M., Lutz C.P., et al. Measurement of Fast Electron Spin Relaxation Times with Atomic Resolution // *Science*. 2010. Vol. 329. No 5999. P. 1628–1630. <https://doi.org/10.1126/science.1191688>
15. Lubbe J., Troger L., Torbrugge S., et al. Achieving High Effective Q-Factors in UltraHigh Vacuum Dynamic Force Microscopy // *Measurement Science and Technology*. 2010. Vol. 21. No 12. P. 125501. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/12/125501>
16. Giessibl F.J. Advances in Atomic Force Microscopy // *Reviews of Modern Physics*. 2003. Vol. 75. No 3. P. 949–983. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.949>
17. Cocker T.L., Peller D., Yu P., et al. Tracking the Ultrafast Motion of a Single Molecule by Femtosecond Orbital Imaging // *Nature*. 2016. Vol. 539. No 7628. P. 263–267. <https://doi.org/10.1038/nature19816>
18. Facchi P., Pascazio S. Quantum Zeno Dynamics: Mathematical and Physical Aspects // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. 2008. Vol. 41. No 49. P. 493001. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/41/49/493001>
19. Raimond J.M., Brune M., Haroche S. Manipulating Quantum Entanglement with Atoms and Photons in a Cavity // *Reviews of Modern Physics*. 2001. Vol. 73. No 3. P. 565–582. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.73.565>
20. Breuer H.P., Petruccione F. The Theory of Open Quantum Systems. New York: Oxford University Press. 2002. 625 p.
21. Weber S.J., Chantasri A., Dressel J., et al. Mapping the Optimal Route Between Two Quantum States // *Nature*. 2014. Vol. 511. No 7511. P. 570–573. <https://doi.org/10.1038/nature13559>

References

1. Sokolovski D., Pons M., Kamalov T. Anomalous Zeno Effect for Sharply Localised Atomic States. *Physical Review A*. 2012. Vol. 86. No 2. P. 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.86.022110>
2. Khalfin L.A. Phenomenological Theory of K-Mesons and the Non-Exponentiality of the Decay Law. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1968. Vol. 8. No 2. P. 106–109. (In Russ.).
3. Misra B., Sudarshan E.G.G. The Zeno's Paradox in Quantum Theory. *Journal of Mathematical Physics*. 1977. Vol. 18. No 4. P. 756–763. <https://doi.org/10.1063/1.523304>
4. Cook R.J. What are Quantum Jumps? *Physica Scripta*. 1988. No 21. P. 49–51. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/1988/T21/009>
5. Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J., et al. Quantum Zeno Effect. *Physical Review A*. 1990. Vol. 41. No 5. P. 2295–2300. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.41.2295>
6. Ahmadiyaz N., Geller M., Konig J., et al. Quantum Zeno Manipulation of Quantum Dots. *Physical Review Research*. 2022. Vol. 4. No 3. P. 032045. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.L032045>

7. Slichter D.H., Muller C., Vijay R., et al. Quantum Zeno Effect in the Strong Measurement Regime of Circuit Quantum Electrodynamics. *New Journal of Physics*. 2016. Vol. 18. No 5. P. 053031. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/5/053031>
8. Burgarth D., Facchi P., Nakazato H., et al. Quantum Zeno Dynamics from General Quantum Operations. *Quantum*. 2020. Vol. 4. No 3. P. 032045. <https://doi.org/10.22331/q-2020-07-06-289>
9. Juha T.M., Juan P.D., Arne L., et al. Storing Quantum Information for 30 Seconds in a Nanoelectronic Device. *Nature Nanotechnology*. 2014. Vol. 9. No 12. P. 986-991. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.211>
10. Morello A., Pla J.J., Zwanenburg F.A., et al. Single-Shot Readout of an Electron Spin in Silicon. *Nature*. 2010. Vol. 467. No 7316. P. 687-691. <https://doi.org/10.1038/nature09392>
11. Claes J., Partoens B., Lamoen D., et al. An Accurate DFT-1/2 Approach for Shallow Defect States: Efficient Calculation of Donor Binding Energies in Silicon. *Nature Publishing Group Computational Materials*. 2026. Vol. 12. No 1. P. 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41524-026-02003-2>
12. Swift M.W., Peelaers H., Mu S., et al. FirstPrinciples Calculations of Hyperfine Interaction, Binding Energy, and Quadrupole Coupling for Shallow Donors in Silicon. *Nature Publishing Group Computational Materials*. 2020. Vol. 6. No 1. P. 181. <https://doi.org/10.1038/s41524-020-00448-7>
13. Muhonen J.T., Dehollain J.P., Laucht A., et al. Coherent Control Via Weak Measurements 31P in Single-Atom Electron and Nuclear Spin Qubits. *Physical Review B*. 2018. Vol. 98. No 15. P. 155201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.155201>
14. Loth S., Etzkorn M., Lutz C.P., et al. Measurement of Fast Electron Spin Relaxation Times with Atomic Resolution. *Science*. 2010. Vol. 329. No 5999. P. 1628-1630. <https://doi.org/10.1126/science.1191688>
15. Lubbe J., Troger L., Torbrugge S., et al. Achieving High Effective Q-Factors in Ultra-High Vacuum Dynamic Force Microscopy. *Measurement Science and Technology*. 2010. Vol. 21. No 12. P. 125501. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/12/125501>
16. Giessibl F.J. Advances in Atomic Force Microscopy. *Reviews of Modern Physics*. 2003. Vol. 75. No 3. P. 949-983. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.949>
17. Cocker T.L., Peller D., Yu P., et al. Tracking the Ultrafast Motion of a Single Molecule by Femtosecond Orbital Imaging. *Nature*. 2016. Vol. 539. No 7628. P. 263-267. <https://doi.org/10.1038/nature19816>
18. Facchi P., Pascazio S. Quantum Zeno Dynamics: Mathematical and Physical Aspects. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. 2008. Vol. 41. No 49. P. 493001. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/41/49/493001>
19. Raimond J.M., Brune M., Haroche S. Manipulating Quantum Entanglement with Atoms and Photons in a Cavity. *Reviews of Modern Physics*. 2001. Vol. 73. No 3. P. 565-582. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.73.565>
20. Breuer H.P., Petruccione F. *The Theory of Open Quantum Systems*. New York: Oxford University Press. 2002. 625 p.
21. Weber S.J., Chantasri A., Dressel J., et al. Mapping the Optimal Route Between Two Quantum States. *Nature*. 2014. Vol. 511. No 7511. P. 570-573. <https://doi.org/10.1038/nature13559>

Информация об авторах

А.А. Борисов, аспирант кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии, Государственный университет просвещения, Москва, Россия;

А.А. Борисов, аспирант кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии, Государственный университет просвещения, Москва, Россия;

Т.Ф. Камалов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии, Государственный университет просвещения, Москва, Россия.

Information about the authors

A.A. Borisov, Postgraduate Student of the Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education, Moscow, Russia;

A.A. Borisov, Postgraduate Student of the Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education, Moscow, Russia;

T.F. Kamalov, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education, Moscow, Russia.